

# 有源 EMI 滤波器 IC 如何在单相和三相电源系统中减轻共模发射并提高功率密度



Timothy Hegarty

## 摘要

设计紧凑高效的电磁干扰 (EMI) 输入滤波器是高密度开关稳压器面临的主要挑战之一，对于在汽车、企业、航天和其他高度受限系统环境中实现电气化的全部优势至关重要。例如，汽车车载充电器和服务器机架电源是高功率应用，在这些应用中，务必要减小 EMI 滤波器元件的体积，使解决方案适应具有挑战性的外形尺寸，尤其是具有快速开关特性的宽带隙（基于氮化镓 [GaN] 和碳化硅 [SiC]）功率半导体器件的出现，可能会导致更高的共模 (CM) 发射。

鉴于接触电流安全要求，用于商业 (A 类) 和住宅 (B 类) 环境的 CM 滤波器通常具有有限的 Y 电容，因此需要大尺寸 CM 扼流圈来实现必要的衰减 - 结果，最终的滤波器设计采用笨重、昂贵且体积大的无源器件。有源 EMI 滤波器 (AEF) 电路的部署可为下一代功率变换系统提供更紧凑的滤波器设计。通过利用有源电源滤波器集成电路 (IC) 显著减少磁性元件和降低总体滤波器尺寸，进一步优化空间受限型应用（例如上述那些应用）的时机已经成熟。

本技术白皮书阐述了 AEF 电路在检测、注入和控制技术方面的理论背景和一般原理，并使用德州仪器 (TI) 的一系列独立 AEF IC 实现了在单相和三相交流电源系统中消除 CM 噪声的实际电路。3.3kW 功率因数校正 (PFC) 交流/直流稳压器的测量结果将说明在降低 EMI 和节省布板空间方面的优势。

## 内容

1 引言.....	3
2 EMI 频率范围.....	3
3 适用于大功率并网应用的无源 EMI 滤波器.....	4
4 有源 EMI 滤波器.....	5
5 广义 AEF 电路.....	6
6 选择 CM 有源滤波器电路.....	8
7 电容放大的概念.....	9
8 AEF 的实际实现.....	10
9 实际结果.....	11
9.1 低压测试.....	11
9.2 高压测试.....	12
10 总结.....	14
11 参考文献.....	14

## 插图清单

图 2-1. IEC 和 CISPR 分类的谐波电流和传导 EMI 频率范围.....	3
图 2-2. 9kHz 至 30MHz 频率范围内的 CISPR 准峰值和平均限值.....	3
图 3-1. 用于单相系统 (a) 和三相系统 (b) 的典型两级无源 EMI 滤波器.....	4
图 3-2. 图腾柱 PFC 参考设计中的传统单相无源 EMI 滤波器.....	5
图 4-1. 具有检测、增益和注入级的 AEF 的基本概念。控制结构可以是 FB (a) 或 FF (b).....	5
图 5-1. 单相等效电路 (四个 FB 和两个 FF 电路) 中根据不同的控制、检测和注入技术进行分类的基本有源滤波器结构： FB-CSVI (a)、FB-CSCI (b)、FB-VSVI (c)、FB-VSCI (d)、FF-VSVI (e) 和 FF-CSCI (f).....	6
图 6-1. 用于说明 CM 滤波和注入电容器倍增基本原理的简化原理图.....	8
图 7-1. 启用 AEF 时的注入分支阻抗 $Z_{INJ}$ 与传统 Y 电容器的比较示例，展示了通过有源反馈操作在较高频率下提升的等效电容.....	9
图 8-1. 用于 CM 衰减的单相 (a) 和三相 (b) AEF 实现示例.....	10
图 8-2. TPSF12C3-Q1 三相独立 AEF IC 的内部方框图.....	11
图 9-1. 低压测试设置原理图.....	11
图 9-2. 使用 AEF 实现单相滤波器.....	12
图 9-3. 禁用和启用 AEF 时的 EN 55032 B 类 EMI 结果.....	12
图 9-4. 采用 TIDM-1007 时的 EMI 性能：使用同一滤波器，禁用和启用 AEF.....	13
图 9-5. 采用 TIDM-1007 时的 EMI 性能：小扼流圈 AEF 设计，与扼流圈无源滤波器比较.....	13
图 9-6. AEF 实现的尺寸缩减：无源滤波器 (a)；有源滤波器 (b).....	13
图 9-7. AEF 实现的面积、体积、成本和重量缩减 (a)；扼流圈尺寸比较 (b).....	13
图 9-8. 无源设计 (2 × 12mH) 和有源设计 (4mH 和 1mH) 中所选的 CM 扼流圈的阻抗特性.....	14

## 表格清单

表 5-1. 图 5-1 中按拓扑 (控制、检测和注入技术) 分类的 AEF 电路.....	7
表 9-1. 无源和有源滤波器实现方案中的 CM 扼流圈元件详细信息.....	14

## 商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

## 1 引言

鉴于接触电流安全要求，用于高密度应用的共模 (CM) EMI 滤波器通常对 Y 电容的总值有限制，因此需要大尺寸 CM 扼流圈来实现目标转角频率或滤波器衰减特性。结果，权衡后的无源滤波器设计采用笨重、昂贵且体积大的 CM 扼流圈，尺寸相当于整个滤波器大小。

但是，有源 EMI 滤波器 (AEF) 电路可为下一代电源管理系统实现更紧凑的滤波器设计。因此，空间受限型应用可使用有源电源滤波器集成电路 (IC) 来减小磁性元件的尺寸和滤波器的总尺寸。附带的好处包括：通过降低功率损耗来改善热管理和提高可靠性，简化机械设计和封装设计，减少受限空间内元件之间的电磁耦合，以及降低成本。

## 2 EMI 频率范围

高频开关网络是开关模式交流/直流稳压器中用于能量转换的重要组成部分。然而，这些开关网络也是输入电流谐波和传导 EMI 的固有来源，因此会影响共用同一个并网输入源的相邻设备的正常运行。

图 2-1 描述了由电磁兼容性 (EMC) 标准组织 (例如国际电工委员会 (IEC) 和国际无线电干扰特别委员会 (CISPR)) 分类的谐波和传导 EMI 频率范围。

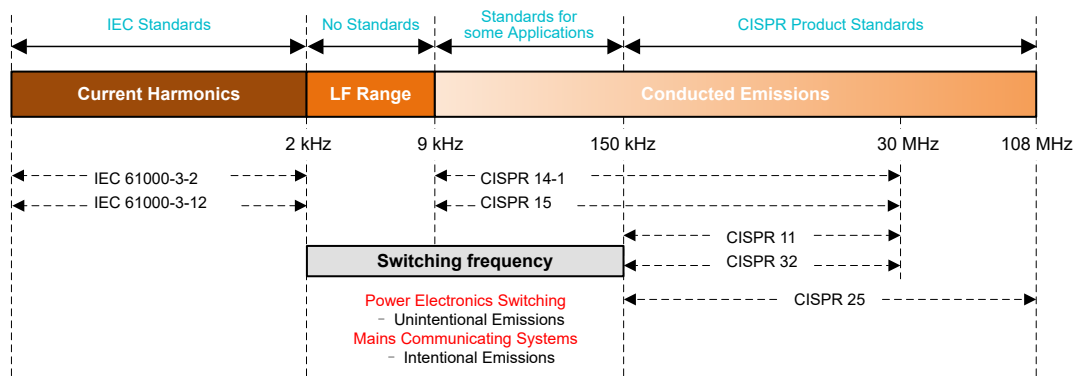


图 2-1. IEC 和 CISPR 分类的谐波电流和传导 EMI 频率范围

应用 PFC 技术可使输入电流谐波在高达 2kHz 的频率下满足 IEC 61000-3-2/-12 设定的限制。但是，仍然必须使用 EMI 滤波器，才能在 150kHz 以上的分类频率范围内衰减高频噪声电流并满足传导发射规范 (例如工业应用的 CISPR 11 和汽车应用的 CISPR 25) [1]，如图 2-2 所示。

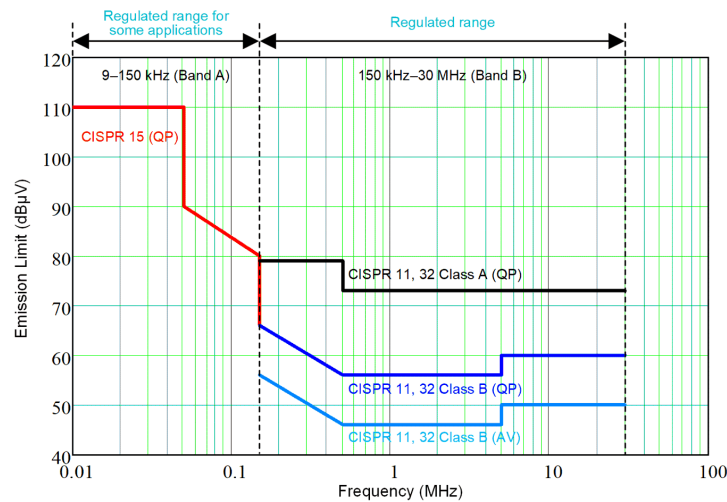


图 2-2. 9kHz 至 30MHz 频率范围内的 CISPR 准峰值和平均限值

如图 2-2 所示，目前只有 CISPR 14-1 和 CISPR 15 产品标准 (分别针对家用电器和照明应用) 规定了低至 9kHz 的发射限值。但是，随着标准化活动的进行，9kHz 至 150kHz 频带和适用的发射限值即将纳入现有的 IEC

61000-6-3 通用 EMI 标准 [1-2]，这必将影响衰减低于 150kHz 的 EMI 滤波器的未来设计。在宽频率范围内降低 EMI 需要相应更大的无源器件。

### 3 适用于大功率并网应用的无源 EMI 滤波器

为了遵守旨在限制传导发射水平的 EMC 法规，需要在开关稳压器和主输入源之间插入一个低通 EMI 滤波器。图 3-1 展示了千瓦级并网应用中单相（三线）和三相（四线）系统的典型滤波器布局。L、N 和 PE 分别指火线、零线和保护地线。如图所示的多级滤波器可提供高滚降，常用于大功率交流线路应用，在这些应用中，CM 噪声通常比差模 (DM) 噪声更难以抑制。尽管图 3-1 省略了用于浪涌脉冲保护和电阻放电的元件，但原理图中实际包含了与输入电源串联以便能够测量总 EMI 的线路阻抗稳定网络 (LISN)，包括 DM 和 CM 传播元件。

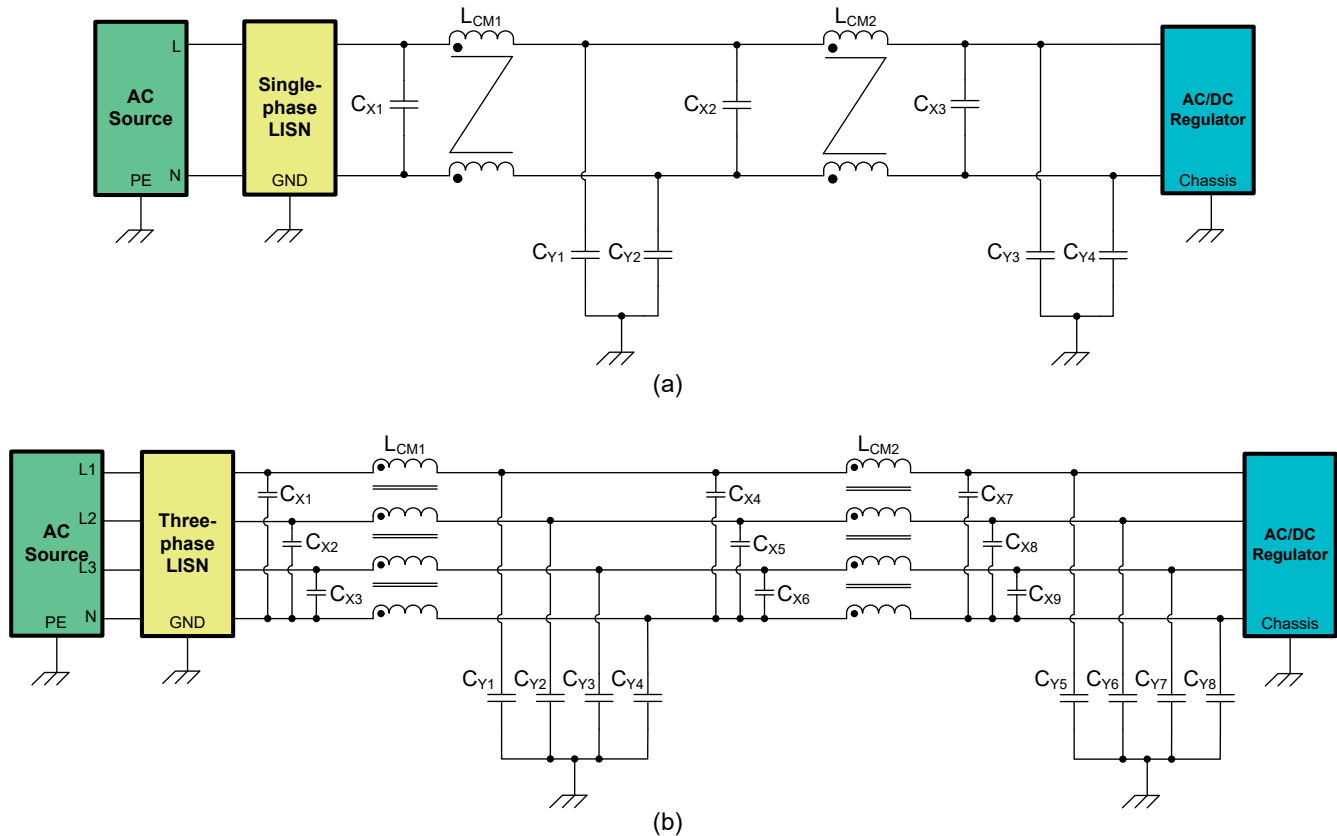


图 3-1. 用于单相系统 (a) 和三相系统 (b) 的典型两级无源 EMI 滤波器

从更高层次看，无源 EMI 滤波器是降低电力电子电路传导发射的一种直观、简单且传统的方法，但是无源器件的尺寸、重量和成本在某些应用中会造成严重限制。此类无源滤波器设计需要插入高阻抗串联元件 (DM 电感器、CM 扼流圈) 和低阻抗分流元件 (X 和 Y 电容器)，因此会在 EMI 电流传播路径中产生阻抗不匹配问题。低阶开关谐波通常根据所需的转角频率 (或多级设计中的多个转角频率) 来决定无功滤波器元件的尺寸。

以图 3-1 中的单相原理图为例，CM 扼流圈  $L_{CM1}$  和  $L_{CM2}$  以及 Y 型电容器  $C_{Y1}$  至  $C_{Y4}$  ( 连接在交流电源线路和接地端之间 ) 可提供 CM 衰减。来自开关稳压器的 CM 电流首先通过稳压器侧 Y 电容器返回，然后通过位于 CM 扼流圈之间的 Y 电容器返回。其余 CM 电流的替代返回路径会通过 LISN 设置的测量阻抗，而这显然会损害 EMI 性能。

如简介中所述，安全法规将总 Y 电容限制在相对较低的值 ( 通常低于 10nF )，为达到期望的转角频率，所需扼流圈的 CM 电感相对较高，在几毫亨的范围内，这使得扼流圈的体积大、笨重且昂贵。与 DM 衰减相反，X 电容器  $C_{X1}$  至  $C_{X3}$  的容值可能较大 ( 通常为 2.2  $\mu$ H )，从而使用 CM 扼流圈的漏电感实现低 DM 电感值。

实际上，CM 扼流圈决定了 EMI 滤波器的尺寸，如实际实现方案 [3] ( 图 3-2 ) 中所示，并会在 EMI 滤波器设计过程中带来多项挑战，包括体积大、热管理问题、声学噪声、滤波器谐振以及元件之间的电磁耦合。此外，滤波器组件的寄生元件 ( 尤其是 CM 扼流圈 ) 会影响高频性能和可实现的衰减。滤波器中使用的分立式元件来自不同制造商，具有不同的外形尺寸，并未进行优化以使它们彼此匹配，因此会影响滤波器实现方案的空间设计和组装。

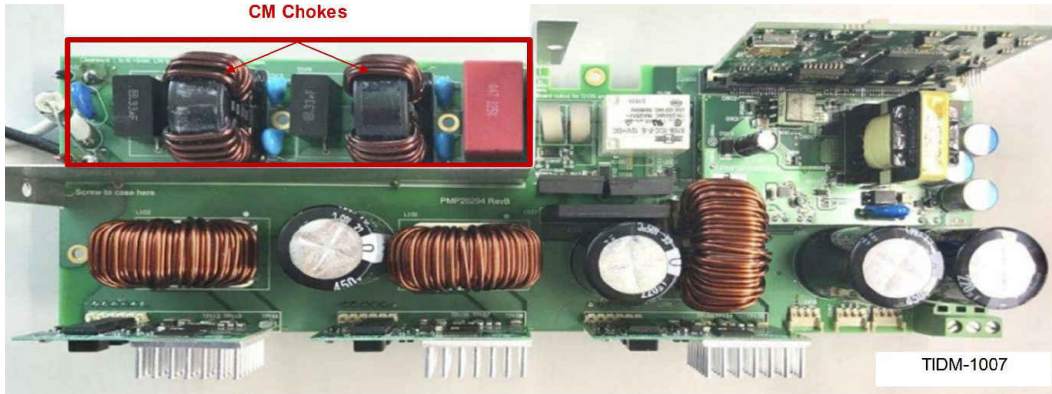


图 3-2. 图腾柱 PFC 参考设计中的传统单相无源 EMI 滤波器

## 4 有源 EMI 滤波器

有许多文献 [4-7] 详细介绍了 AEF 的应用，这种设计与传统的纯无源设计相比，可以使滤波器的尺寸和体积显著减小。与无源 EMI 滤波器非常相似，AEF 电路连接到 EMI 源与 EMI 受扰对象之间的线路，如图 4-1 所示。然而，与无源滤波器不同，AEF 电路使用有源器件和控制来检测残余 ( DM 或 CM ) 电压或电流干扰，并注入可直接抵消该噪声干扰的相反信号。根据等幅反相信号叠加定理，注入的电压或电流理论上可以消除或抵消 EMI 源产生的入射噪声电压或电流影响，这本质上是一种破坏性干扰。这种策略通常应用于声学，并随后应用于 EMI。



图 4-1. 具有检测、增益和注入级的 AEF 的基本概念。控制结构可以是 FB (a) 或 FF (b)

我们期望 AEF 能够显著降低 EMI，使滤波器尺寸比具有等效衰减的传统纯无源设计更小。与 AEF 一起的其他（较小的）无源器件连接到功率级并改善总体衰减，这些电路被称为混合 EMI 滤波器 (HEF)。AEF 和 HEF 电路的设计和实现取决于导电路径 (DM 或 CM) 以及所需的检测、增益和注入级。如图 4-1 所示，消除信号由反馈 (FB) 或前馈 (FF) 方法直接从测量的信号生成。

## 5 广义 AEF 电路

图 5-1 所示为根据检测到的噪声参数 (电压或电流)、注入消除信号的方式 (电压或电流) 和有源控制技术 (FB 或 FF) 进行广义概括的六种有源滤波器配置。

- 电压检测 (VS) 或电流检测 (CS)
- 电压注入 (VI) 或电流注入 (CI)
- FB 控制或 FF 控制结构

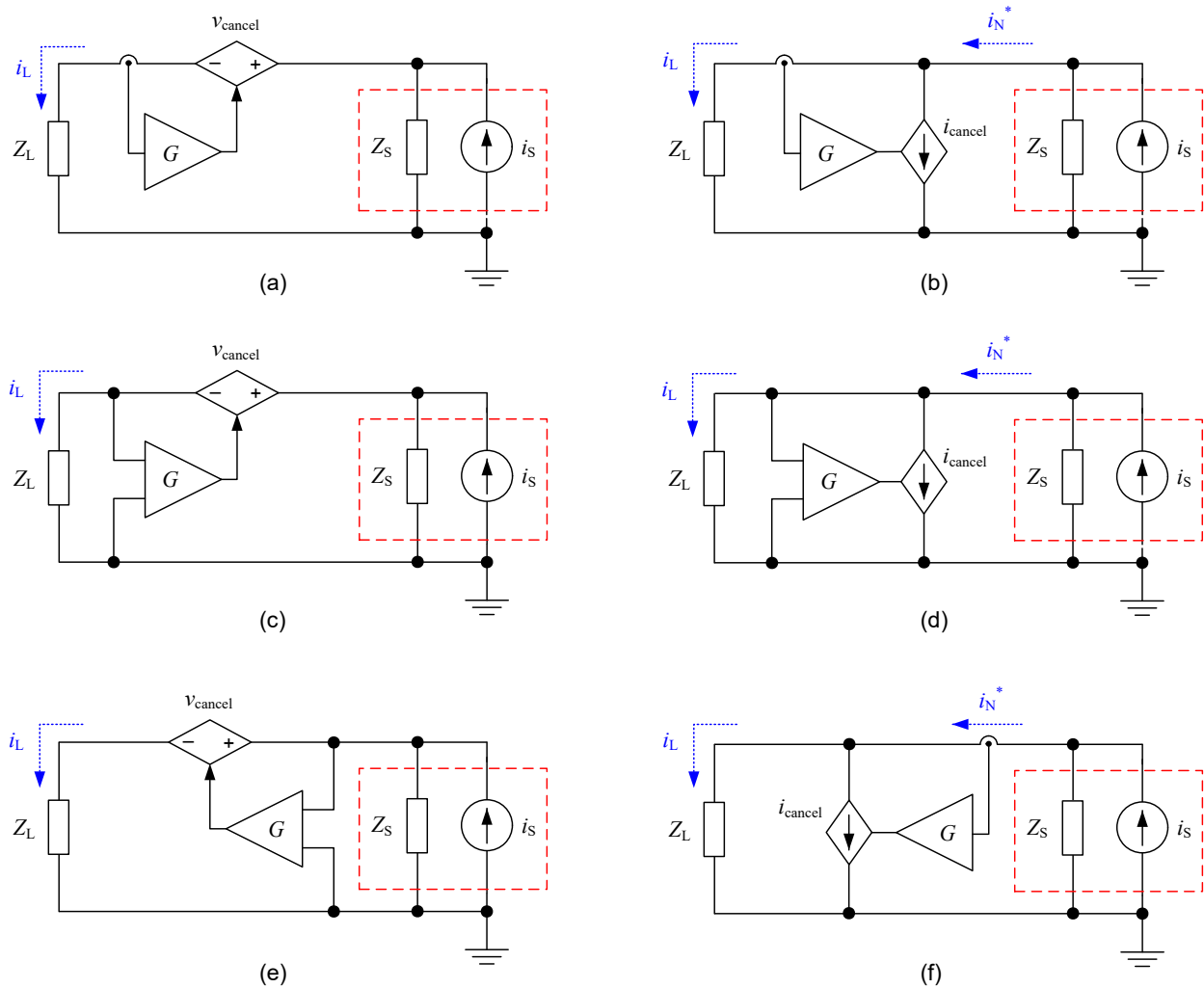


图 5-1. 单相等效电路 (四个 FB 和两个 FF 电路) 中根据不同的控制、检测和注入技术进行分类的基本有源滤波器结构：FB-CSVI (a)、FB-CSCI (b)、FB-VSVI (c)、FB-VSCI (d)、FF-VSVI (e) 和 FF-CSCI (f)

术语  $i_S$  和  $Z_S$  (图 5-1) 指定功率级的诺顿等效噪声电流源和并联源阻抗。 $Z_L$  是噪声接收端 (或 EMI 受扰对象, 例如用于 EMI 测量的 LISN) 的负载阻抗。 $G$  表示有源电路的增益。添加不同的无源元件来代替  $Z_S$  和  $Z_L$  将形成不同的混合电路。

从控制的角度来看，FB 设计会检测 EMI 受扰对象处的残余干扰，使信号反相，用高增益  $G$  将信号放大，然后将信号注入回系统，从而在所需的频率范围内将检测到的参数驱动为零。相比之下，FF 设计会检测 EMI 源处的干扰，使信号反相，用单位增益将信号放大，然后将信号注入回 EMI 受扰对象。FF 的放大器单位增益设置必须具有高精度才能使 EMI 信号和抗 EMI 信号相互抵消，因此 FF 设计的设计难度更高。

在噪声检测方面，VS 和 CS 元件通常分别是电容器和 CS 变压器（或现有磁性元件上的辅助绕组）。在噪声消除方面，VI 设计使用受控串联电压源来阻止噪声电流流向 LISN，而 CI 设计使用受控分流电流源来重新路由噪声源产生的噪声电流，以防止噪声电流流入并被 LISN 测量到。VI 和 CI 设计实际上可以使用负载分别创建分压器和分流器。通常，变压器可以包含串联元件，而电容器则实现分流导通路径。

表 5-1 总结了图 5-1 中包含的 AEF 电路的突出特性，包括插入损耗表达式和高衰减电路条件 [4]。 $Y_S$  和  $Y_L$  分别表示 FB-VSCI 设计的噪声源和负载的导纳。

表 5-1. 图 5-1 中按拓扑（控制、检测和注入技术）分类的 AEF 电路

AEF 拓扑		控制 (FB/FF)	检测 (VS/CS)	注入 (VI/CI)	插入损耗 (IL)	高衰减条件
a	FB-CSVI	反馈	电流	电压	$\left  1 + \frac{G}{Z_S + Z_L} \right $	$ G_1  \gg  Z_S + Z_L $
b	FB-CSCI	反馈	电流	电流	$\left  1 + \frac{Z_S}{Z_S + Z_L} \cdot G \right $	$ Z_S  \gg  Z_L $
c	FB-VSVI	反馈	电压	电压	$\left  1 + \frac{Z_L}{Z_S + Z_L} \cdot G \right $	$ Z_S  \ll  Z_L $
d	FB-VSCI	反馈	电压	电流	$\left  1 + \frac{G}{Y_S + Y_L} \right $	$ G  \gg  Y_S + Y_L $
e	FF-VSVI	前馈	电压	电压	$\left  \frac{1}{1-G} \cdot \left( 1 - \frac{Z_S}{Z_S + Z_L} \cdot G \right) \right $	$G = 1 :  Z_S  \ll  Z_L $
f	FF-CSCI	前馈	电流	电流	$\left  \frac{1}{1-G} \cdot \left( 1 - \frac{Z_L}{Z_S + Z_L} \cdot G \right) \right $	$G = 1 :  Z_S  \gg  Z_L $

$IL = i_{L,w/oAEF} / i_{L,w/AEF}$  是未安装和已安装 AEF 时的滤波器输出电流（通常使用  $50 \Omega$  源阻抗和负载阻抗测得）的商，与可实现的 EMI 衰减相关。如表 5-1 所示，每个 AEF 拓扑都需要特定的阻抗行为来实现高衰减。

## 6 选择 CM 有源滤波器电路

由于 CS 和 VI 的磁性元件都是大尺寸并可能是定制器件（抵消了 AEF 带来的尺寸减小优势），因此建议选择无需使用额外磁性元件的 AEF 拓扑。VSCI 实现方案将电容器与低压有源电路结合使用以进行检测和注入，从而实现更小的尺寸 [5]。

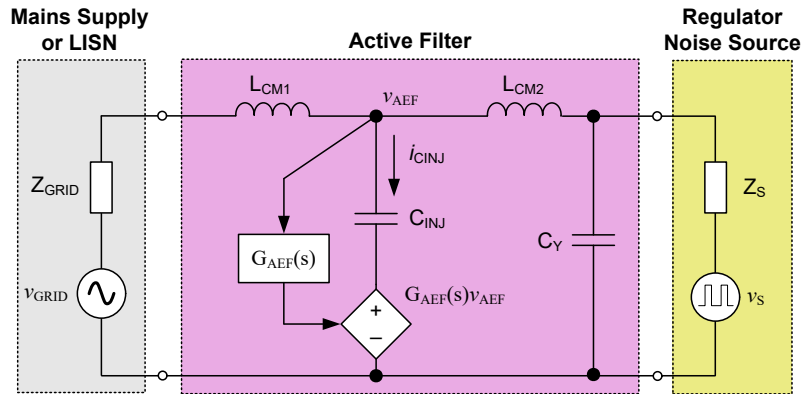


图 6-1. 用于说明 CM 滤波和注入电容器倍增基本原理的简化原理图

图 6-1 所示的简化单相原理图旨在说明在 CM 滤波器设置中选择的 FB-VSCI 电路的基本原理。如前所述，采用这种 AEF 拓扑的主要思路是在等效无源滤波器中使用一个容值与 Y 电容相似的注入电容器来减小 CM 扼流圈的值，因为 CM 扼流圈是大功率滤波器中最大的元件。

戴维南等效 CM 噪声源包含与源阻抗  $Z_S$  串联的电压源  $v_S$ ，该阻抗被视为容性。主电源阻抗  $Z_{GRID}$  通常为感性。被指定为  $L_{CM1}$  和  $L_{CM2}$  的 CM 扼流圈也可用作去耦元件，可实现高衰减 FB-VSCI 设计所需的高源阻抗和负载阻抗（请参阅表 5-1 中的“d”行）。

在将 Y 型检测和注入电容器连接到交流线路后，该电路旨在降低总滤波器体积，但会使用一个影响注入电容器频率响应的有源电路来保持低频接地漏电流处于较低值，从而有效地增加其在高频时的值。反过来，相对于具有等效衰减的无源滤波器的值，这种在所需频率范围内放大的注入电容是降低 CM 扼流圈电感的关键。

该电路的优点为：

- 简单的滤波器结构，具有宽工作频率范围和高稳定性裕度。
- 更小的 CM 扼流圈尺寸可降低体积、重量、功率损耗和成本，同时由于具有更低的扼流圈自寄生效应和更高的自谐振频率 ( $f_{SRF}$ )，还可实现更佳的高频性能。
- 无需额外的磁性元件，仅需 Y 型检测和注入电容器，对峰值接触电流（根据 IEC 60990 进行测量）的影响极小。
- 使用以机箱地为基准的低压 AEF IC 可增强安全性。
- 独立式 AEF IC 可在靠近滤波器元件的位置灵活放置。
- 针对线路电压浪涌的浪涌抗扰能力有助于满足 IEC 61000-4-5 要求。



## 7 电容放大的概念

用于降低 CM 噪声的 AEF 电路可在所需频率范围内放大 CM 扼流圈的视在电感或 Y 电容器的视在电容。针对 CM 衰减配置的 VSCI AEF 使用一个放大器级作为注入电容器  $C_{INJ}$  的电容倍增器。正是这种较高的有源电容值支持以较低的 CM 扼流圈值实现目标衰减。

观察图 6-1，方程式 1 显示注入电容实际上会乘以  $G_{AEF}$ （即从电源线路到放大器输出的 CM 电压增益）：

$$v_{C_{INJ}} = [1 - G_{AEF}(f)]v_{AEF} \quad (1)$$

$$i_{C_{INJ}} = C_{INJ} \frac{dv_{C_{INJ}}}{dt} = [1 - G_{AEF}(f)] C_{INJ} \frac{dv_{AEF}}{dt}$$

$$\Rightarrow C_{INJ,active}(f) = |1 - G_{AEF}(f)| C_{INJ}$$

图 7-1 展示了启用和禁用 FB-VSCI AEF 电路时的注入网络阻抗仿真图。高于 2kHz（尤其是高于 100kHz）的较低阻抗是由 4.7nF 注入电容器的有源电路及其相关阻尼网络的电容放大引起的。

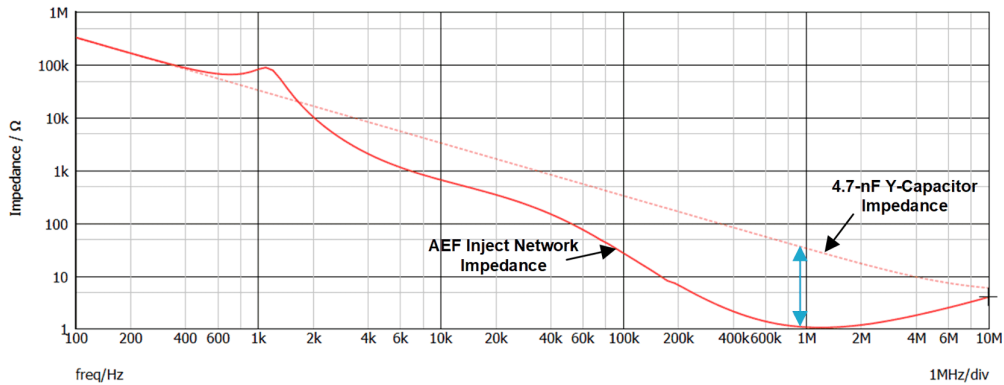


图 7-1. 启用 AEF 时的注入分支阻抗  $Z_{INJ}$  与传统 Y 电容器的比较示例，展示了通过有源反馈操作在较高频率下提升的等效电容

## 8 AEF 的实际实现

图 8-1 展示了在单相和三相电源系统中使用 TPSF12C1、TPSF12C1-Q1、TPSF12C3 和 TPSF12C3-Q1 独立 AEF IC 系列通过 FB-VSCI 配置实现 CM 衰减的实际 AEF 实现方案 [8-11]。这些设置类似于图 3-1 中的两级无源滤波器，只是 AEF IC 现在位于 CM 扼流圈之间，为 CM 电流提供阻抗更低的分流路径。

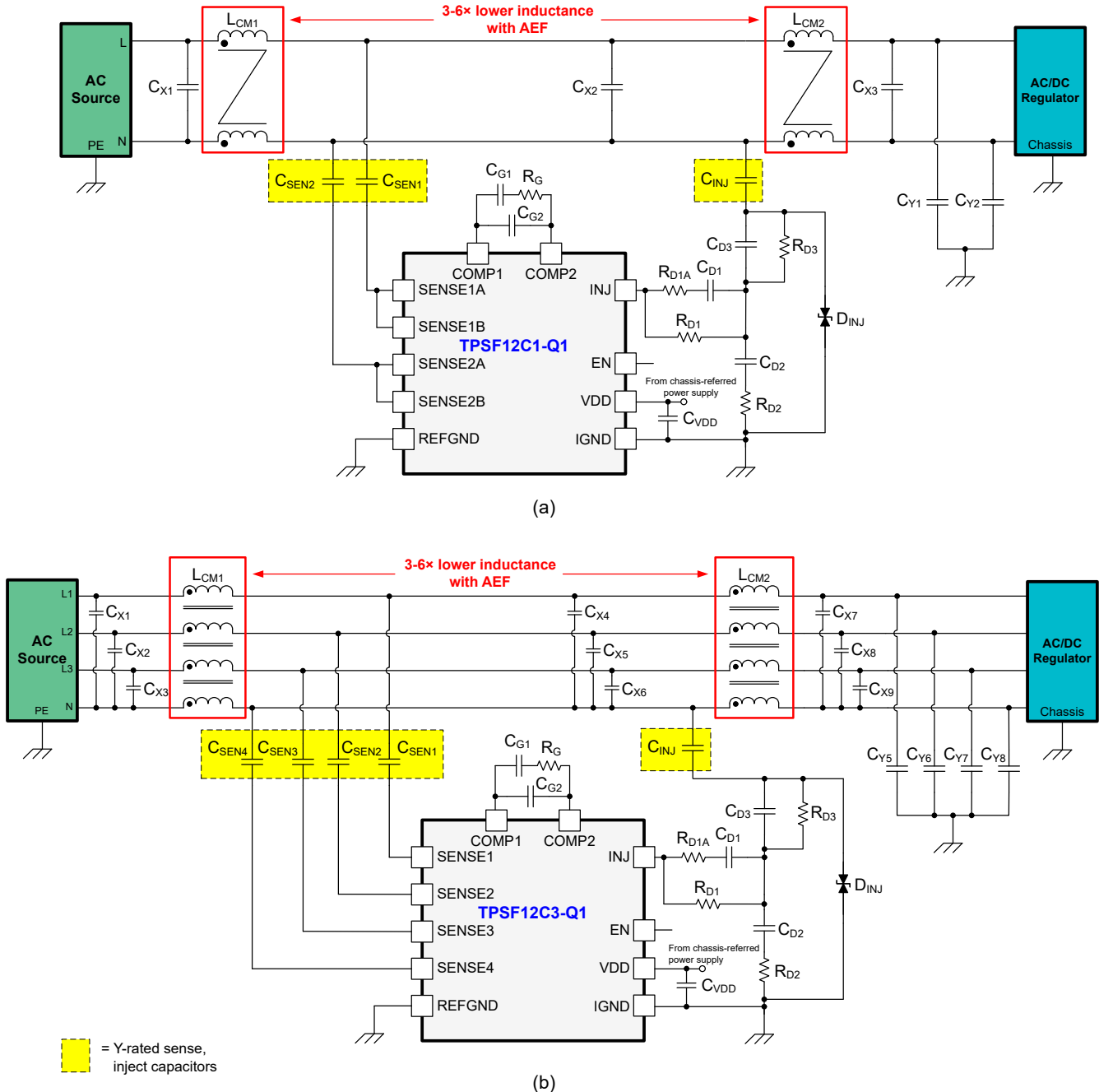


图 8-1. 用于 CM 衰减的单相 (a) 和三相 (b) AEF 实现示例

该器件系列的检测引脚使用一组 Y 型检测电容器 (通常为 680pF) 与电源线路连接，并馈入高通滤波器和信号组合器，如图 8-2 的 IC 方框图所示。该 IC 可抑制线路频率 (50Hz 或 60Hz) 交流电压以及 DM 干扰，同时使用外部可调阻尼电路来放大高频 CM 干扰并保持闭环稳定性。

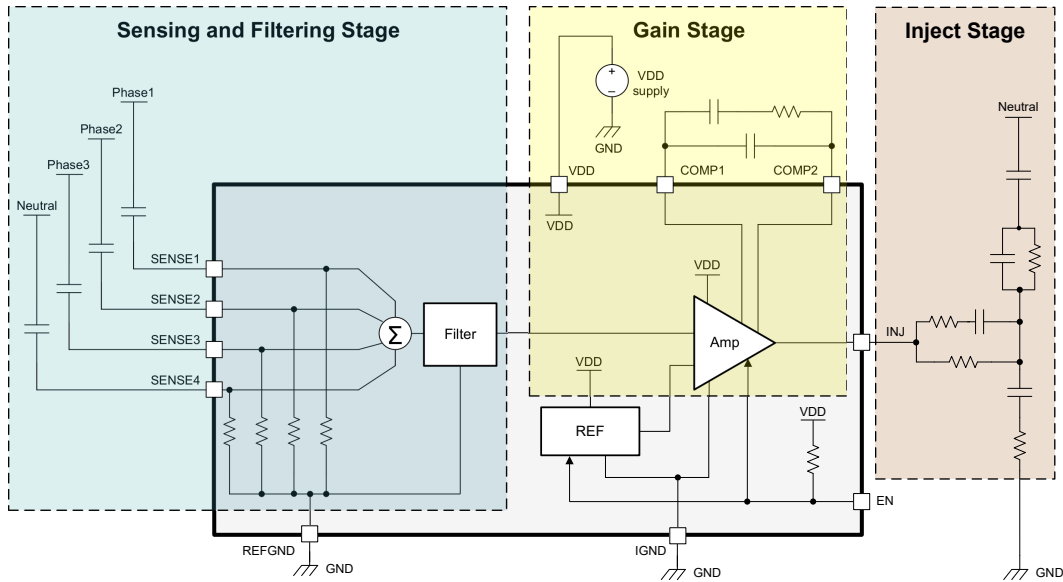


图 8-2. TPSF12C3-Q1 三相独立 AEF IC 的内部方框图

COMP1 和 COMP2 引脚之间的元件构建一个用于设置放大增益特性的超前延迟网络。功率放大器在 INJ 处的输出通过阻尼和稳定性网络（请参阅图 8-1 中带有下标“D”参考标识符的元件）和 Y 型注入电容器  $C_{INJ}$ （通常为 4.7nF）将所需的降噪信号注入回电源线路中。该 IC 包含集成滤波、补偿和保护电路。VDD 辅助电源的电压范围为 8V 至 16V，标称电压为 12V，并参考系统机箱接地。

从 CM 的角度来看，放置于两个 CM 扼流圈之间的 X 电容器可以有效地在电源线路之间提供低阻抗路径，通常可达到低兆赫兹频率。该路径仅使用一个注入电容器便可将电流注入到一条电源线路（通常为零线）。如果三相滤波器是没有零线的三线系统，则会将 TPSF12C3-Q1 的 SENSE4 引脚接地，并将注入电容器通过 X 电容器的人工星型连接进行耦合。

## 9 实际结果

### 9.1 低压测试

图 9-1 所示为单相 AEF 电路的原理图，其中采用 TPSF12C1-Q1 有源滤波器 IC 实现 CM 噪声衰减。该设计包括稳压器侧和电网侧 Y 电容器。LISN 为 EMI 接收器提供了合适的接口来进行 150kHz 至 30MHz 的 EMI 测量。

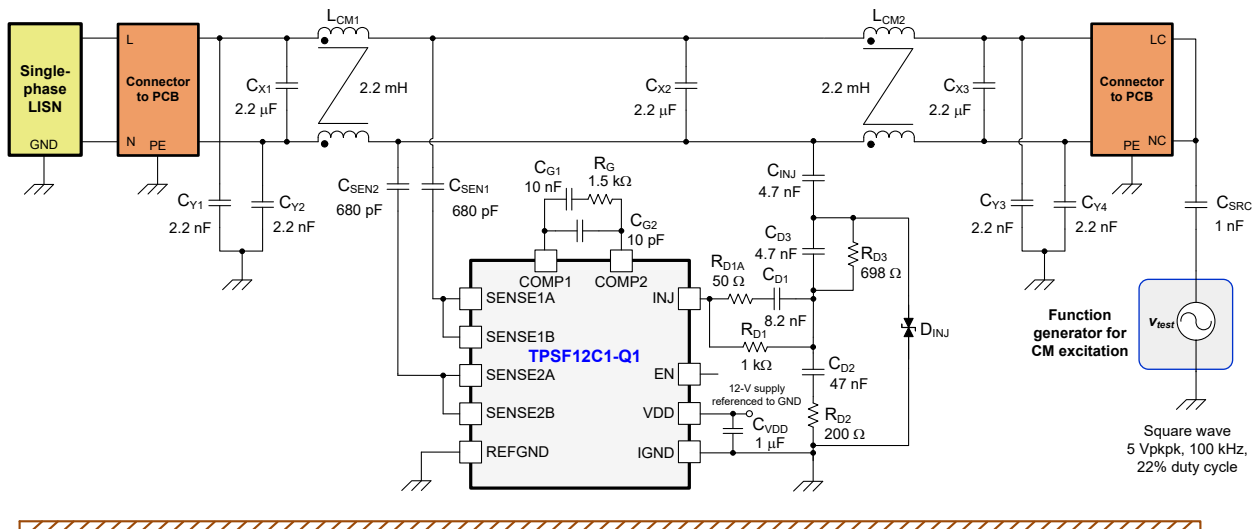


图 9-1. 低压测试设置原理图

如图 9-1 所示，从函数发生器产生的方波信号相当于便捷的 CM 噪声激励源，而 1nF 电容器模拟开关稳压器的实际 CM 噪声源阻抗。通过调整源电压的幅度和转换时间可设置在 LISN 上测得的合理噪声幅度和频谱包络。

这种支持信号注入的简单低压测试有助于在高压工作环境下连接到开关稳压器之前，安全且方便地对 EMI 测试室内的滤波器进行性能鉴定。

图 9-2 所示为滤波器板的实现方案。图 9-3 展示了使用准峰值 (QP) 和平均 (AV) 噪声检测器并禁用和启用 AEF 时的 EMI 结果。从图 9-3 中可以明显看出，AEF 在低频率范围 (100kHz 至 3MHz) 内提供高达 30dB 的 CM 噪声衰减，因此，使用两个 2mH 纳米晶扼流圈的滤波器可实现与使用两个 12mH 扼流圈的无源滤波器设计相当的 CM 衰减性能。

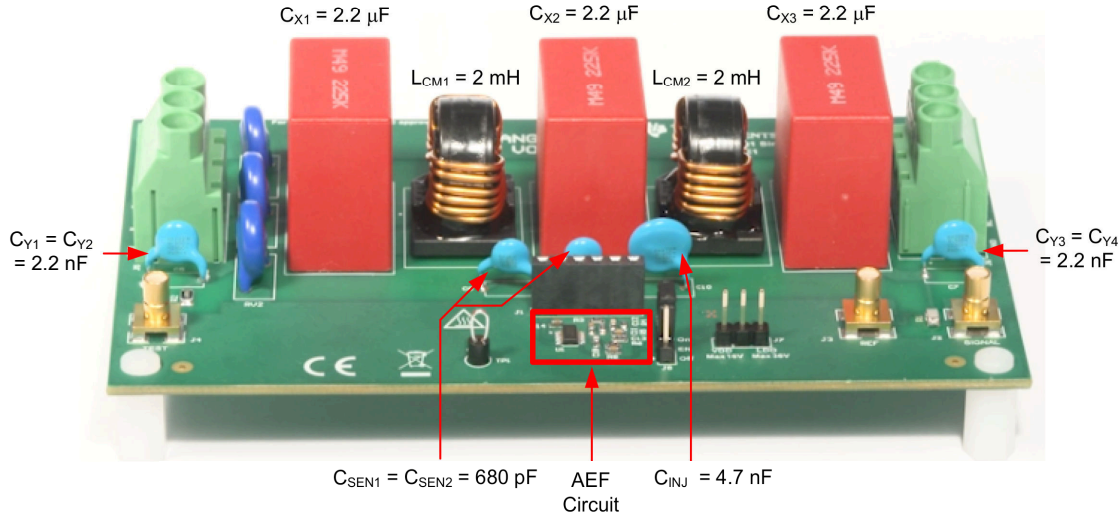


图 9-2. 使用 AEF 实现单相滤波器

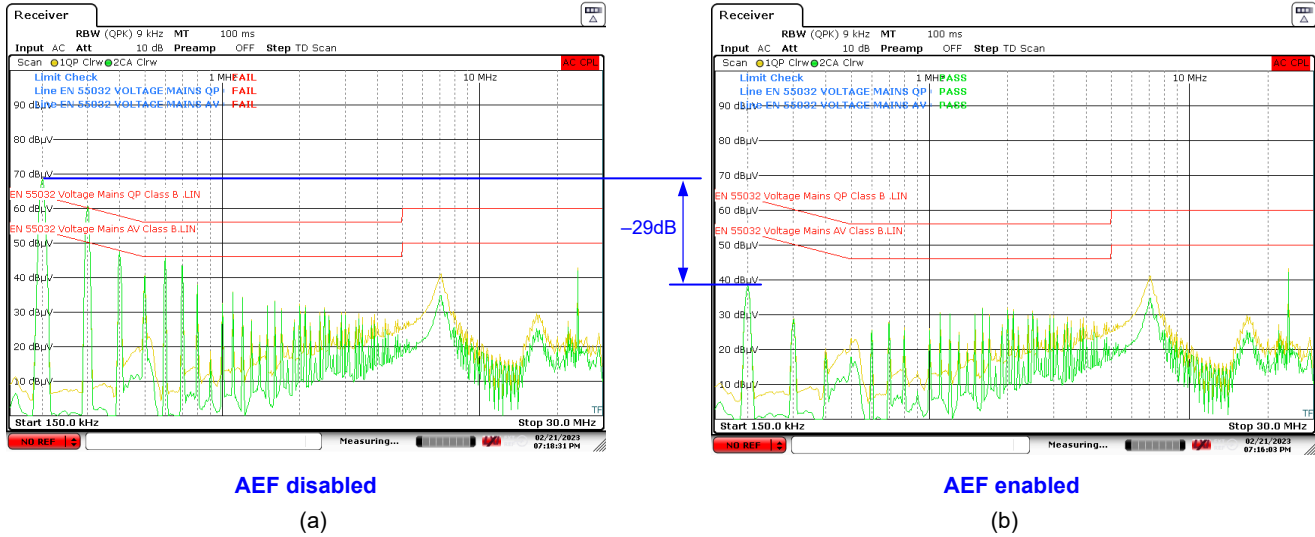


图 9-3. 禁用和启用 AEF 时的 EN 55032 B 类 EMI 结果

## 9.2 高压测试

图 9-4 和图 9-5 展示了使用 TPSF12C1-Q1 单相 AEF IC 测得的 CM EMI 性能，其中使用了高效率 GaN CCM 图腾柱无桥功率因数校正 (PFC) 参考设计 (图 3-2 所示的 TIDM-1007) 的功率级，这是一款 3.3kW 单相无桥 PFC 转换器 [3]，采用了开关频率为 100kHz 的 LMG3410 GaN 功率器件。

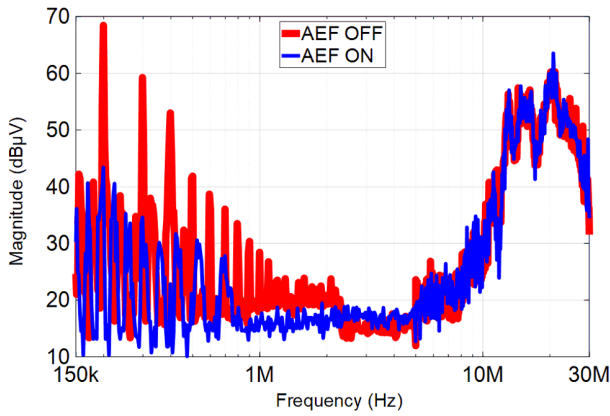


图 9-4. 采用 TIDM-1007 时的 EMI 性能：使用同一滤波器，禁用和启用 AEF

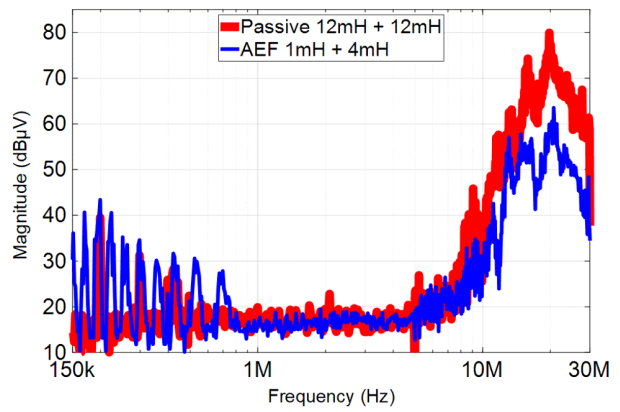


图 9-5. 采用 TIDM-1007 时的 EMI 性能：小扼流圈 AEF 设计，与扼流圈无源滤波器比较

从图 9-4 中可以明显看出，AEF 在低频范围（150kHz 至 3MHz）内提供 15dB 至 30dB 的 CM 噪声衰减，因此使用 1mH 和 4mH 纳米晶扼流圈的滤波器可实现与使用两个 12mH 扼流圈的无源滤波器设计相当的 CM 衰减性能（如图 9-5 所示）。为了支持公平比较，这些扼流圈来自采用相似磁芯材料的同一元件系列（供应商：Würth Elektronik）。此外，由于绕组内寄生电容较低，基于 AEF 的设计的较小尺寸扼流圈可在 10MHz 以上的频率下提供更好的衰减。

图 9-6 展示了用于实现图 9-5 中所示 EMI 结果的滤波器的照片。AEF 可将 CM 扼流圈的箱体体积降低 52%，如图 9-7 所示。

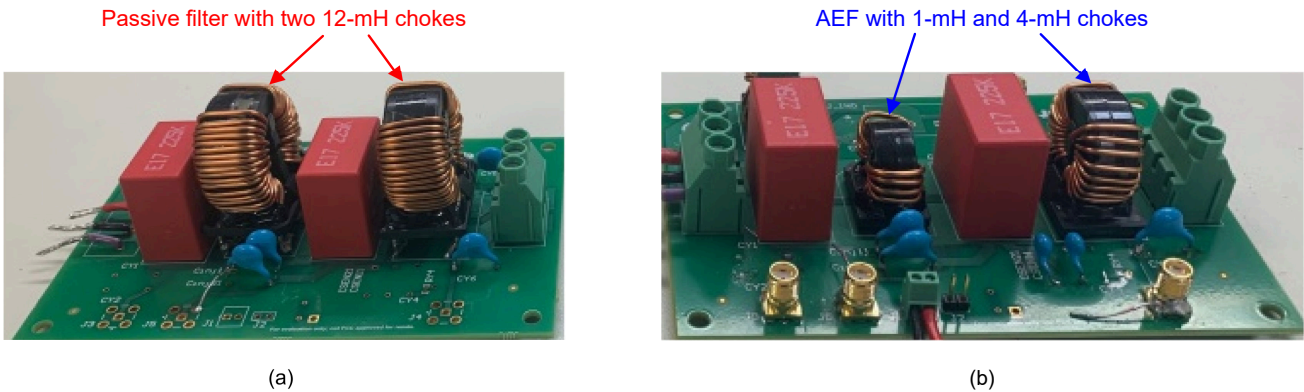


图 9-6. AEF 实现的尺寸缩减：无源滤波器 (a)；有源滤波器 (b)

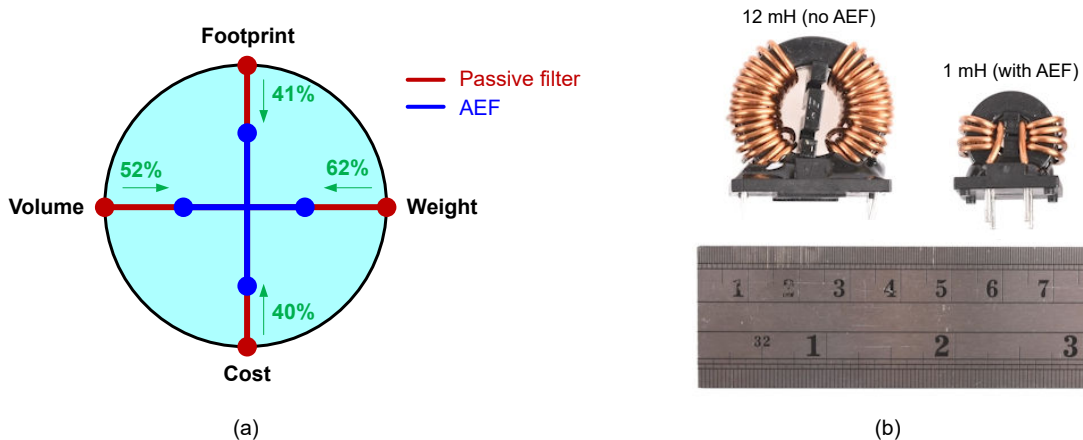


图 9-7. AEF 实现的面积、体积、成本和重量缩减 (a)；扼流圈尺寸比较 (b)

表 9-1 列出了图 9-6 中突出显示的 CM 扼流圈的适用参数。AEF 在  $10A_{RMS}$  时可降低 60% 的总铜损 ( $P_{Cu} = 6W - 2.36W = 3.64W$ ，忽略因温升而增加的绕组电阻)，这意味着元件工作温度更低、电容器寿命更长。

表 9-1. 无源和有源滤波器实现方案中的 CM 扼流圈元件详细信息

滤波器	CM 扼流圈器件型号	数量	$L_{CM}$ (mH)	$R_{DCR}$ (m $\Omega$ )	$f_{SRF}$ (MHz)	尺寸(L × W × H, mm)	质量 (g)	$P_{Cu}$ (W)
无源	7448051012	2	12	15	0.8	23 × 34 × 33	36	3.0
有源	7448041104	1	4	8.5	10	19 × 28 × 28	17	1.7
	7448031501	1	1	3.3	40	17 × 23 × 25	10	0.66

图 9-8 提供了 CM 扼流圈的阻抗曲线，旨在突出具有更高自谐振频率和更高高频性能但尺寸更小的元件。更低的绕组内电容在高频下会使 CM 阻抗更高，例如，电网侧 CM 扼流圈在 30MHz 时的阻抗从  $150\Omega$  增加到  $1.1k\Omega$  (从无源设计中的 12mH 到有源设计中的 1mH)。图 9-8 在 10MHz 和 30MHz 处的 × 和 o 标记表示无源和有源设计的相应阻抗。有源设计在超过 10MHz 后具有更高的扼流圈阻抗，因此在很大程度上消除了对电网侧 Y 电容器的需求。

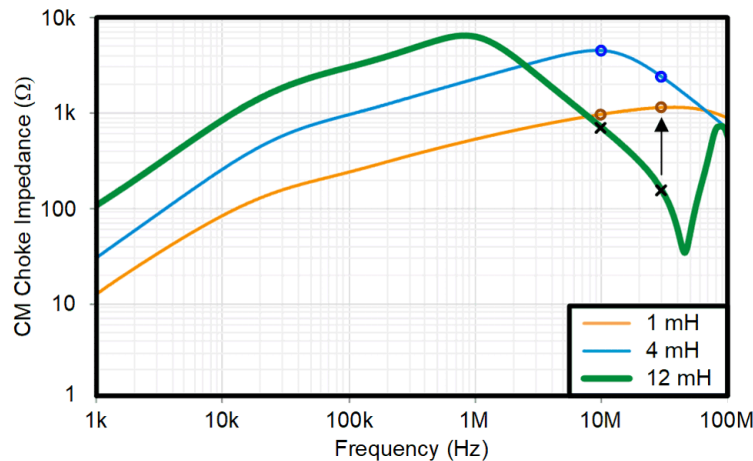


图 9-8. 无源设计 (2 × 12mH) 和有源设计 (4mH 和 1mH) 中所选的 CM 扼流圈的阻抗特性

正如预期的那样，相对于单相设计中常见的垂直安装扼流圈，三相电路中的水平安装扼流圈通常可以更大程度减少空间占比。

## 10 总结

功率半导体技术和封装的最新发展使电源的实现方案具有更高的效率和功率密度。然而，更高的开关性能以及实现这些优势的更小封装尺寸也是提升 CM 发射信号的部分原因。下一代电力电子产品向更高密度、更高性能、更轻重量和更低成本的转变需要采用新的 EMI 滤波器设计方法。在此背景下，EMI 滤波器级的紧凑高效设计是高密度开关稳压器设计中的主要挑战之一，特别是对于解决方案尺寸和成本是重要考量因素的汽车和工业应用。

有源滤波器实现方案 (如上所述) 可以抑制测得的 CM 噪声信号，其实际结果表明，与等效的纯无源设计相比，有源滤波器实现方案可以显著减小 CM 扼流圈元件的体积。其他优势包括：通过降低功率损耗来改善热管理并提高系统级可靠性，通过降低元件重量来提高机械稳健性，通过降低扼流圈寄生电容来提升高频性能，以及降低成本。

## 11 参考文献

- 德州仪器 (TI) 白皮书：[电源的传导 EMI 规格概述](#)
- 德州仪器 (TI) 白皮书：[降低直流/直流稳压器 EMI 的工程师指南](#)
- “高效率 GaN CCM 图腾柱无桥功率因数校正 (PFC) 参考设计”。德州仪器 (TI) 参考设计编号 TIDM-1007。
- Son, Yo-Chan, and Sul, Seung-Ki. “Generalization of Active Filters for EMI Reduction and Harmonics Compensation.” Published in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 42, no. 2 (March-April 2006): pp. 545-551.

5. Heldwein, Marcelo Lobo, Hans Ertl, Juergen Biela, and Johann W. Kolar. “[Implementation of a Transformerless Common-Mode Active Filter for Offline Converter Systems.](#)” Published in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, no. 5 (May 2010): pp. 1772-1786.
6. Narayanasamy, Balaji, and Luo, Fang. “[A Survey of Active EMI Filters for Conducted EMI Noise Reduction in Power Electronic Converters.](#)” Published in *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 61, no. 6 (December 2019): pp. 2040-2049.
7. Kumar, Ashish, Hou, Yuetao, Ramadass, Yogesh, Merkin, Tim, Hegarty, Timothy, Obidat, Abdallah. “An Active EMI filter for High-Power Off-Line Applications.” Published in *2023 Applied Power Electronics Conference and Exhibition*, March 19-23, 2023.
8. 德州仪器 (TI) [电源滤波器 IC](#) 登录页面。
9. 适用于单相系统的 [TPSF12C1](#) 和 [TPSF12C1-Q1](#) 共模有源 EMI 滤波器。
10. 适用于三相系统的 [TPSF12C3](#) 和 [TPSF12C3-Q1](#) 共模有源 EMI 滤波器。
11. 德州仪器 (TI) 技术文章：[独立式有源 EMI 滤波器 IC 如何缩小共模滤波器尺寸](#)

## 重要声明和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、某特定用途方面的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他功能安全、信息安全、监管或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的应用。严禁对这些资源进行其他复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。您应全额赔偿因在这些资源的使用中对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 的销售条款](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款/TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

邮寄地址：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265

Copyright © 2023，德州仪器 (TI) 公司